

相転移温度近傍における QCD のトポロジー励起

Topological excitation of QCD near the critical temperature

深谷英則

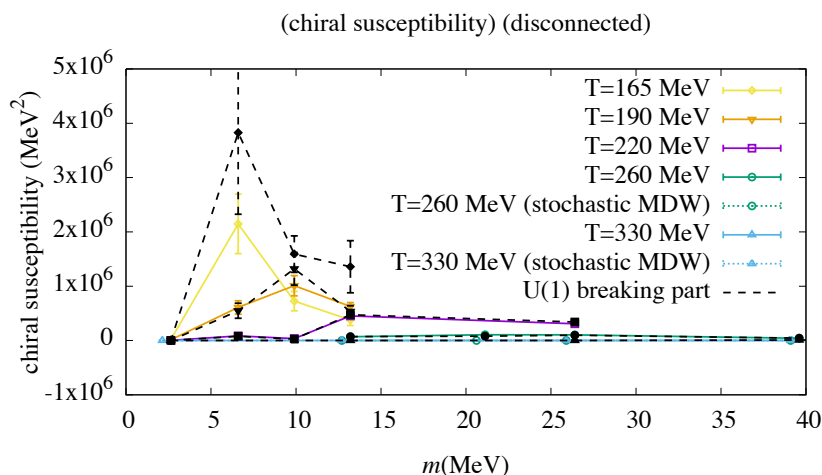
大阪大学大学院理学研究科

1. 研究目的

ビッグバン直後に起きたと考えられている QCD の相転移の詳細を明らかにすることは、素粒子論、宇宙論、原子核理論にまたがる重要な研究課題である。本プロジェクトの目的はカイラル相転移における軸性 U(1)量子異常の寄与を定量的に検証することである。2020 年度までの研究成果で、温度 190MeV 以上の高温相において、カイラル感受率のシグナルのほとんどが軸性 U(1)量子異常に由来するという驚くべき結果を得た。もし、軸性 U(1)量子異常が相転移直上においても支配的であるならば、インスタントンの発見直後に Gallan-Dashen-Gross 1978 によって議論された SU(2) \times SU(2)カイラル対称性の破れのトリガーとして軸性 U(1)量子異常が役割を果たすというシナリオが正しいことになる。本研究では相転移付近まで温度を下げたシミュレーションを厳密なカイラル対称性を保つ格子作用を用いて行い、軸性 U(1)量子異常の効果を定量評価する。

2. 研究成果の内容

温度 165MeV に相当する $32^3 \times 16$ 、および $40^3 \times 16$ 格子の QCD シミュレーションを物理点を含む up down クォーク質量 4 点で行い、トポロジカルチャージ、Dirac 演算子の固有値/固有関数、再重みづけ因子を計算、そこからトポロジー感受率、axial U(1)感受率、カイラル感受率の各量を抽出した。統計量はまだ十分ではないが、クォーク質量ゼロ付近における量子異常の強い抑制、カイラル感受率のシグナルがほぼ axial U(1)



量子異常に由来していることを確認した。左の図は disconnected のカイラル感受率の preliminary な結果である。色のついた全シグナルを黒の点線で示した量子異常の寄与が占めていることが確認できる。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究の主題であるトポロジー励起は、軸性 U(1) アノマリーの帰結として現れるが、格子 QCD の先行研究では、トポロジー励起は高温で抑制されないとされる研究がほとんどであった。しかし、私たちの研究で先行研究の結果は、トポロジー励起を過大評価している可能性が高いことが明らかになった。本プロジェクトは世界で初めてカイラル対称性を厳密に保つフェルミオン作用を用いて行われた QCD 数値計算である。その計算コストは従来の手法に比べて10倍ほど高いため、学際共同利用による大規模数値計算が不可欠であり、本研究の成功の鍵となった。

4. 今後の展望

2021 年度に行った相転移点近傍における $32^3 \times 16$ および $40^3 \times 16$ 格子のシミュレーションを予定の統計量まで実行、有限体積効果を精査する。特にカイラル感受率の体積依存性は相転移の回数に関する重要な情報を含む。後半は相転移点より低温側と見積もる $32^3 \times 18$ の格子へ移行する。同じ課題で応募採択された富岳一般機動的課題 hp210231 および大阪大学 RCNP に申請した SQUID プロジェクトと相補的に研究を進める。

5. 成果発表

(1) 学術論文

S. Aoki, Y. Aoki, Hidenori Fukayas, S. Hashimoto, C. Rohrhofer, K. Suzuki (JLQCD collaboration), “Role of the axial U(1) anomaly in the chiral susceptibility of QCD at high temperature,” PTEP 2022 (2022) 2, 023B05.

(2) 学会発表

- ① 青木慎也, 青木保道, 深谷 英則*, 橋本省二, 金森逸作, 金児隆志, 中村宜文, Christian Rohrhofer, 鈴木溪 [JLQCD collaboration], “有限温度 QCD 相転移における U(1) 量子異常の役割,” 日本物理学会 2021 年秋季大会, 2021 年 9 月 14 日 - 9 月 17 日, online.
- ② Hidenori Fukaya, “What is chiral susceptibility probing?,” KEK Theory Workshop 2021, Dec 7-9 2021, KEK(online)
- ③ Hidenori Fukaya, “What is chiral susceptibility probing?,” The 38th International Symposium on Lattice Field Theory [Lattice 2021], D July 26-30 2021, MIT(online)

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	449,280	269,500
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			